УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ПЛЕНОЧНОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

Р.Ф. Бекишев, Д.Ю. Ляпунов

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Обосновано применение емкостных пленочных двигателей малой мощности в устройствах микроперемещений. Рассмотрены принцип действия, конструкция и основные закономерности работы пленочных емкостных микродвигателей. Получены динамические характеристики системы, на основании которых установлены основные требования к системе питания и управления.

В последнее время благодаря бурному развитию технологий микроэлектроники и новых энергоемких материалов появилась возможность создания принципиально новых электромеханических структур – пленочных емкостных микродвигателей, которые используются для контроля и измерения параметров тонкопленочных изделий.

Разработка технологии нанесения тонких сегнетоэлектрических пленок [1, 2], обладающих высоким значением относительной диэлектрической проницаемости (до 10^4...10^5 и выше) позволила создать новый тип емкостных устройств – пленочных микродвигателей, работа которых основана на явлении электростатического наката тонких сегнетоэлектрических пленок на поверхность металла или наоборот [3].

На рис. 1 показана конструктивная схема пленочного сегнетоэлектрического микродвигателя [4].

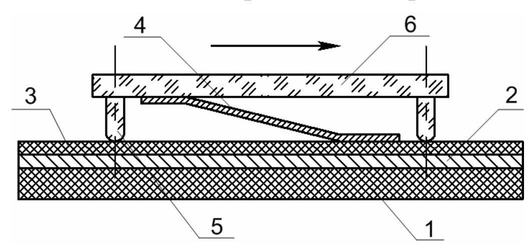


Рис. 1. *Конструктивная схема пленочного сегнетоэлектрического микродвигателя*

Статор микродвигателя представляет кремниевую подложку – 1, на поверхность которой нанесен слой металла – 2 и сегнетоэлектрическая пленка ($BaTiO_3$) – 3. Ротор – 4 в виде металлической гибкой пластины перемещается относительно статора. Двигатель работает в воздушной среде при нормальном атмосферном давлении. Механический контакт осуществляется по направляющим – 5. При подаче импульса напряжения между статором и ротором происходит электростатический накат пластины ротора на поверхность сегнетоэлектрика, в результате чего пластина ротора изгибается и передает импульс движения стеклянной платформе – 6, осуществляя электромеханическое преобразование энергии.

Планарные емкостные микродвигатели данного типа могут обеспечить путь перемещения 10...40 мм, шаг перемещения ротора 0,01...10 мкм при частоте тактов импульсов прямоугольной формы 100...10000 Гц, напряжении до 100 В. Удельная энергоемкость планарных микродвигателей достигает 1 Дж/м^3, что значительно выше энергоемкости индуктивных и пьезоэлектрических аналогов [5].

Для исследования основных показателей работы пленочного микродвигателя проведено математическое моделирование процесса микроперемещения платформы – 6 в режиме отработки единичного шага при следующих допущениях:

1. Не учитывается дискретное распределение электрических зарядов в веществе, следовательно, среда, в которой рассматривается электрическое поле, является сплошной.
2. Отсутствуют поля рассеяния.
3. Не принимается во внимание краевой эффект, т.е. явление накопления заряда на границе раздела – газ – твердый диэлектрик. Физически исключить рассматриваемый эффект можно, применив разнополярное напряжение питания.
4. Сегнетоэлектрик обладает высоким удельным сопротивлением, малым тангенсом угла диэлектрических потерь, потери в нем пренебрежимо малы по сравнению с потерями на трение и перемещение платформы.
5. Не принята во внимание сила инерции, которая мала по сравнению с силой, приводящей платформу в движение.

Физическая модель микродвигателя представляет собой конденсатор с подвижной металлической обкладкой, рис. 2.

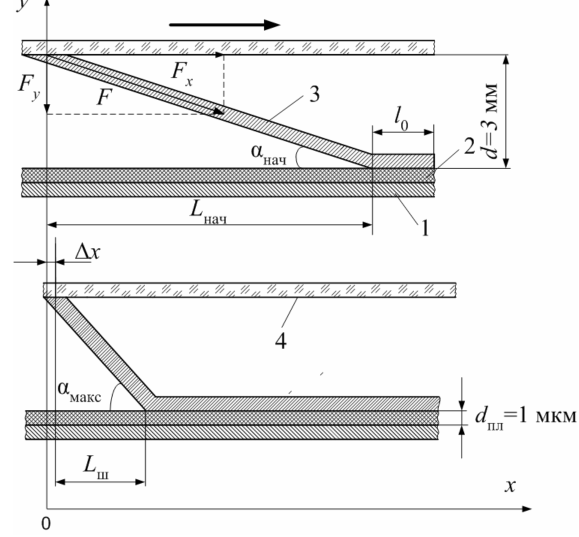


Рис. 2. *Модель пленочного емкостного микродвигателя*

На рис. 2 приняты следующие обозначения: 1 – слой металла, 2 – тонкая сегнетоэлектрическая пленка титаната бария толщиной $d_{пл}$=1 мкм, 3 – металлическая пленка из бериллиевой бронзы, 4 – платформа (направляющие не показаны), $\alpha_{нач}$, $\alpha_{макс}$ – начальный и максимальный углы наката, которые определяются параметрами пленки и приложенным напряжением питания, $\Delta x=h(t)|_{t=T_и}$ – шаг двигателя, $T_и$ – время импульса приложенного напряжения, l_0 – длина начального наката при t=0, $L_ш=L(t)|_{t=0}$, $L_ш=L(t)|_{t=T_и}$, где $L(t)$ – функция, описывающая проекцию на ось x длины пленки, которая не участвует в накате, d=3 мм – расстояние от поверхности статора до платформы.

Направление оси x указывает направление движения. В первом приближении изгиб пленки будет описываться уравнением кубической параболы

$$y(x) = -\frac{3}{2}(hx/L) + 2(h^3/L^3).$$

Работа электростатического наката определяется суммой трех составляющих – кинетической энергии системы, работой сил трения направляющих о платформу и энергией деформации металлической пленки A_d [6]:

$$A_н = \frac{m}{2}\left(\frac{dh}{dt}\right)^2 + \int_0^{\Delta x} F(x)dx + A_d, \qquad (1)$$

где m – масса платформы, $F(x)$ – сила нагрузки.

Сила нагрузки определяется действием силы тяжести и нормальной составляющей силы натяжения пленки F_y

$$F(x) = k(mg + F_y(x)),$$
$$F_y(x) = F(x)\operatorname{tg}\alpha(t),$$

где k=0,2 – коэффициент трения направляющих о поверхность сегнетоэлектрика [6], g – ускорение свободного падения, $\operatorname{tg}\alpha(t) = \frac{d}{L(t)}$.

Функция, описывающая положение платформы при накате

$$h(t) = \frac{1}{2}\int_{\Delta x}^{\Delta x+L(t)}\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx - \frac{1}{2}\int_{\Delta x}^{\Delta x+L_{нач}}\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx = \frac{3d^2}{5L_{нач}}\left(\frac{L_{нач}}{L(t)} - 1\right).$$

Энергия деформации металлической пленки определяется из следующего выражения

$$A_d = \int_{\Delta x}^{\Delta x+L(t)} \frac{EJ}{2}\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 dx = 6\,d^2EJ\left(\frac{1}{L^3} - \frac{1}{l_0^3}\right),$$

где E – модуль Юнга пленки, $J=bh^3$, где b – ширина пленки.

Удельная работа наката

$$a_н = k_0\frac{C_0U^2}{2},$$

где C_0 – удельная взаимоемкость, U=100 В – приложенное напряжение, k_0 – коэффициент, который учитывает потерю контакта между пленкой и сегнетоэлектрической поверхностью. Согласно рекомендациям [7], k_0 принят равным 0,8.

Работа наката определяется как

$$A_н = a_н S_н,$$

где $S_н=bL(t)$ – площадь контакта.

Подставив выведенные выражения в уравнение энергетического равновесия системы (1), и решая его численными методами, получаем следующие динамические характеристики микродвигателя.

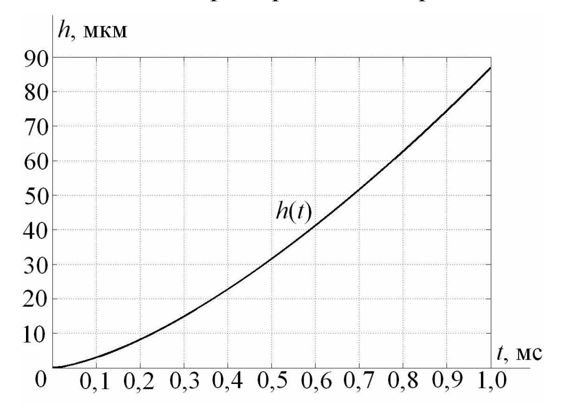


Рис. 3. *Зависимость шага перемещения от времени*

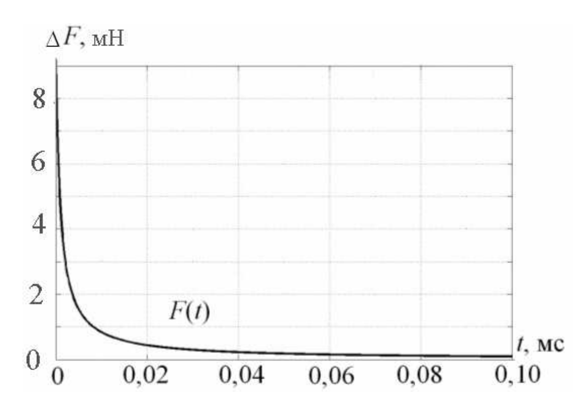


Рис. 4. *Усилие, приложенное к платформе микродвигателя в функции времени*

Анализ рис. 3 показывает, что при изменении длительности импульса приложенного напряжения будет получен различный шаг перемещения исполнительного органа микропривода. Путь перемещения платформы зависит от количества импульсов и ограничивается геометрическими размерами статора микродвигателя. Линейная скорость перемещения платформы изменяется и зависит от частоты подачи импульсов.

Усилие, развиваемое микродвигателем, максимально при подаче импульса напряжения и уменьшается со временем по нелинейному закону (рис. 4).

В результате проведенного математического моделирования выявлены закономерности работы емкостного пленочного микродвигателя в области

малых перемещений. Амплитуда импульса приложенного напряжения, поданного от системы питания, определится электрическими параметрами тонкопленочного диэлектрика (напряжением пробоя) на поверхности статора, время импульса без учета сил инерции – требуемой точностью перемещения. Таким образом, с помощью полученных характеристик установлены основные особенности системы питания рассматриваемого двигателя.

Разработанная математическая модель позволяет получить динамические характеристики системы с учетом всех геометрических параметров двигателя и свойств материалов, применяемых при изготовлении. Это дает возможность использовать данную модель при проектировании как силовой части системы, так и системы управления, оптимизировать геометрические параметры двигателя по критерию максимума движущей силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li C.L., Chen Z.H., Zhou Y.L., Cui D.F. Effect of oxygen content on the dielectric and ferroelectric properties of laser-deposited $BaTiO_3$ thin films // J. Phys. Condens. Matter. – 2001. – № 13. – P. 5261–5268.
2. Prakash D., Sharma B.P., Rama Mohan T.R., Gopalan P. Flux addition in Barium Titanate: overview and prospects // J. Solid State Chemistry. – 2000. – № 155. – P. 86–95.
3. Дятлов В.Л., Коняшкин В.В., Потапов Б.С., Фадеев С.И. Пленочная электромеханика. – Новосибирск: Наука, 1991. – 247 с.
4. Бекишев Р.Ф., Ляпунов Д.Ю., Семенова Л.Н. Применение емкостных устройств для контроля и измерения параметров тонкопленочных структур в микроэлектронике и медицине // Измерение, контроль, информатизация: Матер. VI Междунар. научно-техн. конф. – Барнаул, 2005. – С. 69–74.
5. Бекишев Р.Ф., Ляпунов Д.Ю. Перспективы и проблемы создания емкостных устройств // Оборудование. Регион. – 2005. – № 2(10). – С. 12–14.
6. Baginsky I.L., Kostsov E.G. High-energy capacitance electrostatic micromotors // J. of Micromechanics and Microengineering. – 2003. – № 13. – P. 190–200.
7. Коняшкин В.В. Релаксация сил в пленочных емкостных структурах // Вычислительные системы. Моделирование в пленочной электромеханике. – 1982. – № 95. – С. 54–61.

УДК 621.313.333:62-83:519.87